

УДК 621.398.628.971

ГЕНЕРАТОР ЛИНЕЙНО-ИЗМЕНЯЮЩЕГОСЯ НАПРЯЖЕНИЯ – ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ НАПРЯЖЕНИЯ В ЧАСТОТУ ИМПУЛЬСОВ

М. П. ТИЛИЧЕНКО

*Учреждение образования «Гомельский государственный
технический университет имени П. О. Сухого»,
Республика Беларусь*

Введение

В работе [1] приведена методика упрощенного расчета параметров RC -элементов преобразователя напряжение–частота (ПНЧ) (рис. 1), а в работе [2] раскрываются недостатки этой методики, и дается уточненный алгоритм расчета. При этом в обеих работах расчет производится с единственной целью – получить на выходе преобразователя импульсы заданной частоты.

В качестве исходных данных используются следующие величины:

f – частота следования импульсов на выходе ПНЧ;

$U_{\text{вх}}^-$ – величина отрицательного напряжения постоянного тока на входе ПНЧ;

$U_{\text{нас}}$ – величина напряжения насыщения выходных транзисторов используемой в ПНЧ микросхемы операционного усилителя;

U_{VD} – величина падения напряжения на диоде VD при прямом его включении;

$U_{\text{ми}}$ – амплитудное значение линейно-изменяющегося напряжения на выходе интегрирующего усилителя.

Из нижеизложенного следует, что анализ работы ПНЧ и алгоритм определения параметров RC -элементов схемы ПНЧ может быть упрощен, если к перечисленным выше исходным данным добавить длительность импульса $t_{\text{и}}$.

Кроме того, в работах [1], [2] нет анализа работы устройства рис. 1 и нет расчетных выражений для определения параметров RC -элементов в случае подачи на вход положительного напряжения $U_{\text{вх}}^+$ и обратного включения диода VD (рис. 3), хотя работоспособность ПНЧ в этом случае очевидна. В работах [1], [2] также нет данных об экспериментальном исследовании работы ПНЧ.

Постановка задачи:

- выполнить анализ работы ПНЧ (рис. 1, 3) как для $U_{\text{вх}}^-$, так и для $U_{\text{вх}}^+$ с целью получения простых и точных выражений для расчета параметров RC -элементов;
- дать простой и строгий алгоритм расчета параметров RC -элементов ПНЧ;
- сравнить результаты исследований с данными работ [1] и [2];
- выполнить экспериментальное исследование работы ПНЧ с целью проверки результатов теоретических исследований.

Анализ работы ГЛИН-ПНЧ для отрицательного входного напряжения

На рис. 1 приведена схема ГЛИН-ПНЧ, описанная в работах [1] и [2].

На рис. 2 приведены временные синхронизированные во времени диаграммы напряжений $u_{\text{п}}(t)$ – на выходе преобразователя, $u_{\text{г}}(t)$ – на выходе генератора линейно-

изменяющегося напряжения, т. е. на выходе интегрирующего усилителя и $u_k(t)$ – на неинвертирующем входе триггера Шмита, выполняющего функцию нуля-компаратора.

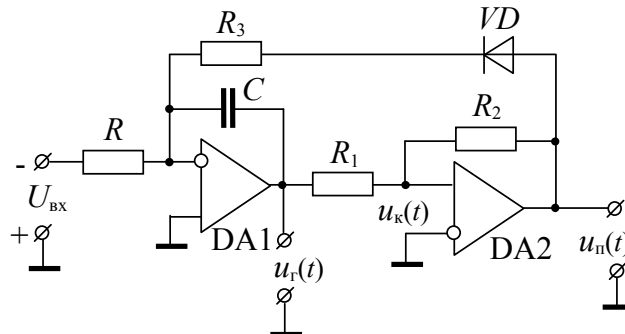


Рис. 1. Генератор линейно-изменяющегося напряжения – преобразователь напряжения в частоту для отрицательного входного напряжения

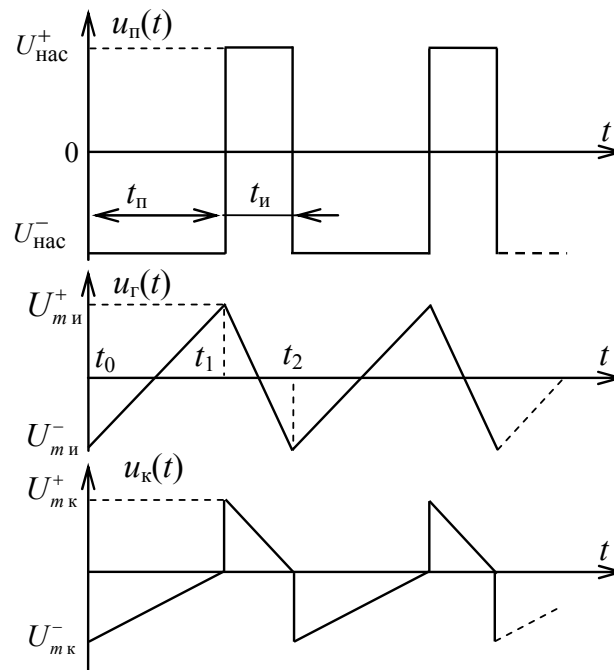


Рис. 2. Временные диаграммы напряжений на входах ГЛИН-ПНЧ по рис. 1

Анализ работы этого устройства выполним, воспользовавшись подходом, применяемым в работе [3] для схем ГЛИН с внешним запуском и ГЛИН, работающим в автогенераторном режиме.

Пусть в установившемся режиме в момент времени $t_0 = 0$ напряжение $u_n(t_0) = U_{нас}^-$, а $u_r(t_0) = U_{mи}^-$ (рис. 2). В период времени $t_1 - t_0 = t_п$ напряжение на конденсаторе будет нарастать по линейному закону:

$$u_r(t) = -\frac{U_{ВХ}^-}{RC}t + u_r(t_0) \quad (1)$$

в пределах от $U_{mи}^-$ до $U_{mи}^+$.

Из (1) следует, что для $t = t_{\pi}$

$$U_{m\pi}^+ = \frac{U_{\text{вх}}}{RC} t_{\pi} + U_{m\pi}^- \quad (2)$$

где $U_{\text{вх}}$ – модуль входного напряжения.

Из (2) получаем выражение для расчета R и C :

$$RC = \frac{U_{\text{вх}} t_{\pi}}{2U_{m\pi}} \quad (3)$$

Напряжение $u_{\kappa}(t)$ на неинвертирующем входе микросхемы DA2 также изменяется по линейному закону в интервале $t_1 - t_0 = t_{\pi}$:

$$u_{\kappa}(t) = \frac{u_{\pi}(t)}{R_1 + R_2} R_1 + \frac{u_{\Gamma}(t)}{R_1 + R_2} R_2 \quad (4)$$

Из (4) для $t = t_{\pi}$ следует выражение

$$0 = \frac{U_{\text{нас}}^-}{R_1 + R_2} R_1 + \frac{U_{m\pi}^+}{R_1 + R_2} R_2 \quad (5)$$

или

$$\frac{R_1}{R_2} = -\frac{U_{m\pi}^+}{U_{\text{нас}}^-} \quad (6)$$

Так как $U_{\text{нас}}^- = -U_{\text{нас}}$, то из (6) следует, что

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{U_{m\pi}}{U_{\text{нас}}} \quad (7)$$

В момент времени $t_1 = t_{\pi}$ $u_{\kappa}(t) = 0$, и триггер Шмита скачком изменяет свое состояние с $U_{\text{нас}}^-$ на $U_{\text{нас}}^+$ (рис. 2). При этом открывается диод VD , и конденсатор начнет перезаряжаться через резистор R_3 от $U_{m\pi}^+$ до $U_{m\pi}^-$ по линейному закону в интервале времени $t_2 - t_1 = t_{\pi}$:

$$u_{\Gamma}(t_0) - \frac{U_{\text{вх}}^-}{RC} (t_{\pi} + t_{\pi}) - \frac{u_{\Gamma}(t) - U_{VD}}{R_3 C} t \quad (8)$$

В момент времени $t = t_{\pi}$, это напряжение станет равным $U_{m\pi}^-$. Так как $u_{\Gamma}(t_0) = U_{m\pi}^-$, а

$$u_{\Gamma}(t_{\pi}) = U_{\text{нас}}^+,$$

то из (8) следует:

$$U_{m\pi}^- + \frac{U_{\text{вх}}}{RC} (t_{\pi} + t_{\pi}) - \frac{U_{\text{нас}} - U_{VD}}{R_3 C} t_{\pi} = U_{m\pi}^- \quad (9)$$

Считая $t_{\text{и}}$ заданной величиной и подставив в (9) выражение для $t_{\text{п}} = \frac{2RCU_{\text{м и}}}{U_{\text{вх}}}$, которое следует из (3), получим выражение для расчета R_3 :

$$R_3 = \frac{R(U_{\text{нас}} - U_{\text{VD}})}{2RCU_{\text{м и}} + U_{\text{вх}} t_{\text{и}}}. \quad (10)$$

Частота следования импульсов на выходе устройства рис. 1 равна

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{t_{\text{п}} + t_{\text{и}}} = \frac{1}{2RCU_{\text{м и}}} \left[U_{\text{вх}} - \frac{R_3}{R(U_{\text{нас}} - U_{\text{VD}})} U_{\text{вх}}^2 \right]. \quad (11)$$

Анализ работы ГЛИН-ПНЧ для положительного входного напряжения

Изменим полярность входного напряжения и полярность включения диода VD по рис. 3.

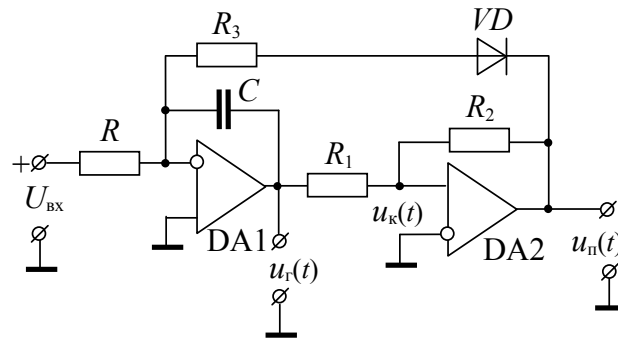


Рис. 3. Генератор линейно изменяющегося напряжения–преобразователь напряжения в частоту для положительного входного напряжения

Временные синхронизированные диаграммы напряжений для этого варианта устройств приведены на рис. 4.

Производя рассуждения, аналогичные приведенным в предыдущем разделе, получаем выражения для расчета параметров RC -элементов схемы рис. 3:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{U_{\text{м и}}}{U_{\text{нас}}}; \quad (12)$$

$$RC = \frac{U_{\text{вх}} t_{\text{и}}}{2U_{\text{м и}}}; \quad (13)$$

$$R_3 = \frac{R(U_{\text{нас}} - U_{\text{VD}}) t_{\text{п}}}{2RCU_{\text{м и}} + U_{\text{вх}} t_{\text{п}}}. \quad (14)$$

Очевидно, что частота генерируемых импульсов для схемы (рис. 3) будет определяться по выражению (11).

Приравняв нулю (11), получим, что устройства (рис. 1, 3) не будут генерировать импульсы, если $U_{\text{вх}} = 0$ и если

$$U_{\text{вх max}} \geq \frac{R}{R_3} (U_{\text{нас}} - U_{\text{VD}}). \quad (15)$$

При строгом равенстве (15) $f = 0$, а при соблюдении неравенства $U_{\text{вх}} > U_{\text{вх max}}$ $f < 0$, что также означает отсутствие генерации.

Взяв производную от f по $U_{\text{вх}}$ и приравняв ее нулю, получим условие максимума генерируемой частоты импульсов:

$$U_{\text{вх}} = \frac{R}{2R_3}(U_{\text{нас}} - U_{VD}). \quad (16)$$

При этом

$$f_{\text{max}} = \frac{U_{\text{нас}} - U_{VD}}{8U_{\text{мн}} R_3 C}. \quad (17)$$

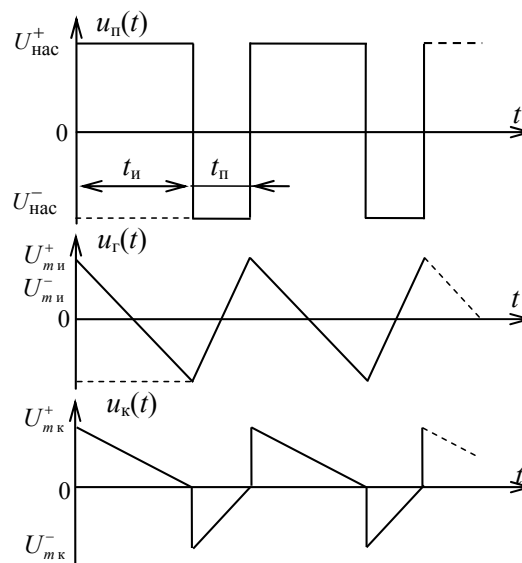


Рис. 4. Временные диаграммы напряжений на входах ГЛИН-ПНЧ по рис. 3

Решая (3) и (10) относительно $t_{\text{п}}$ и $t_{\text{и}}$ и подставляя в эти выражения $U_{\text{вх}}$ из (16), получим, что

$$t_{\text{п}} = t_{\text{и}} = \frac{T}{2} = \frac{1}{2f} = \frac{4R_3 C U_{\text{мн}}}{U_{\text{нас}} - U_{VD}}. \quad (18)$$

Порядок расчета параметров RC-элементов ГЛИН-ПНЧ

1. Определить по справочнику или экспериментально величины $U_{\text{нас}}$ и U_{VD} для выбранного к применению типа операционного усилителя DA1, DA2 и диода VD.

2. Рассчитать величину $\frac{R_1}{R_2}$ по (7) и, задавшись стандартным значением $R_1 \geq 2$ кОм, определить R_2 .

3. По заданным $T = \frac{1}{f}$ и $t_{\text{и}}$ определить $t_{\text{п}} = T - t_{\text{и}}$, рассчитать $\tau = RC$ по (3) при $U_{\text{вх}} < 0$ или по (13) при $U_{\text{вх}} > 0$ и, задавшись стандартным значением емкости C , определить $R = \frac{\tau}{C}$.

4. Определить значение R_3 по (9) для $U_{\text{вх}} < 0$ или по (14) при $U_{\text{вх}} > 0$.

Численные исследования

Пример 1. Дано: $U_{\text{вх}} = -10$ В; $f = 800$ Гц; $U_{\text{м и}} = 5$ В; $U_{\text{нас}} = 13,5$ В; $U_{\text{VD}} = 0,5$ В;
 $t_{\text{и}} = 0,25 \cdot 10^{-3}$ с;

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{U_{\text{м и}}}{U_{\text{нас}}} = 0,37.$$

Если принять $R_1 = 10$ кОм, то $R_2 = 27$ кОм;

$$t_{\text{п}} = \frac{1}{f} - t_{\text{и}} = \frac{1}{800} - 0,25 \cdot 10^{-3} = 1 \cdot 10^{-3} \text{ с};$$

$$\tau = RC = \frac{U_{\text{вх}} t_{\text{п}}}{2U_{\text{м и}}} = \frac{10 \cdot 1 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 5} = 1 \cdot 10^{-3} \text{ с}.$$

Если $C = 0,1 \cdot 10^{-6}$ Ф, то $R = \frac{\tau}{C} = 10$ кОм;

$$R_3 = \frac{R(U_{\text{нас}} - U_{\text{VD}})t_{\text{и}}}{2RCU_{\text{м и}} + U_{\text{вх}}t_{\text{и}}} = \frac{10^4(13,5 - 0,5)0,25 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 1 \cdot 10^{-3} \cdot 5 + 10 \cdot 1,25 \cdot 10^{-3}} = 2,6 \text{ кОм}.$$

Для найденных параметров преобразователь будет работать в интервале $50 \text{ В} > U_{\text{вх}} > 0$. При $U_{\text{вх}} = 25$ В частота генерируемых импульсов максимальна и равна

$$f_{\text{max}} = \frac{U_{\text{нас}} - U_{\text{VD}}}{8U_{\text{м и}}R_3C} = \frac{13,5 - 0,5}{8 \cdot 5 \cdot 2,6 \cdot 10^3 \cdot 0,1 \cdot 10^{-6}} = 1250 \text{ Гц, а } t_{\text{и}} = t_{\text{п}} = 0,4 \cdot 10^{-3} \text{ с}.$$

Пример 2. Дано: $U_{\text{вх}} = -10$ В; $f = 800$ Гц; $U_{\text{м и}} = 5$ В; $U_{\text{нас}} = 13,5$ В; $U_{\text{VD}} = 0,5$ В;
 $t_{\text{и}} = 1 \cdot 10^{-3}$ с;

$$R_1 = 10 \text{ кОм}; R_2 = 27 \text{ кОм};$$

$$t_{\text{п}} = \frac{1}{800} - 1 \cdot 10^{-3} = 0,25 \cdot 10^{-3} \text{ с}; \tau = RC = \frac{10 \cdot 0,25 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 5} = 0,25 \cdot 10^{-3} \text{ с}.$$

Если $C = 0,1 \cdot 10^{-6}$ Ф, то $R = \frac{\tau}{C} = 2,5$ кОм;

$$R_3 = \frac{2,5 \cdot 10^3(13,5 - 0,5)1 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 2,5 \cdot 10^3 \cdot 0,1 \cdot 10^{-6} + 10 \cdot 1 \cdot 10^{-3}} = 2,6 \text{ кОм}.$$

Преобразователь будет работать в интервале $12,5 \text{ В} > U_{\text{вх}} > 0$. При $U_{\text{вх}} = 6,25$ В $f_{\text{max}} = 1250$ Гц и $t_{\text{и}} = t_{\text{п}} = 0,4 \cdot 10^{-3}$ с.

Пример 3. Дано: $U_{\text{вх}} = 10$ В; $f = 800$ Гц; $U_{\text{м и}} = 5$ В; $U_{\text{нас}} = 13,5$ В; $U_{\text{VD}} = 0,5$ В;
 $t_{\text{и}} = 0,25 \cdot 10^{-3}$ с. Расчет ведем по выражениям (12), (13), (14):

$$R_1 = 10 \text{ кОм}; R_2 = 27 \text{ кОм};$$

$$t_{\text{п}} = 1 \cdot 10^{-3} \text{ с}; t_{\text{и}} = 0,25 \cdot 10^{-3} \text{ с}; \tau = 0,25 \cdot 10^{-3} \text{ с}; C = 0,1 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}; R = 2,5 \text{ кОм};$$

$$R_3 = \frac{2,5 \cdot 10^3 (13,5 - 0,5) 1 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 2,5 \cdot 10^3 \cdot 0,1 \cdot 10^{-6} + 10 \cdot 1 \cdot 10^{-3}} = 2,6 \text{ кОм};$$

$$12,5 \text{ В} > U_{\text{вх}} > 0.$$

При $U_{\text{вх}} = 6,25 \text{ В}$; $f_{\text{max}} = 1250 \text{ Гц}$ и $t_{\text{и}} = t_{\text{п}} = 0,4 \cdot 10^{-3} \text{ с}$.

Пример 4. Дано: $U_{\text{вх}} = 10 \text{ В}$; $f = 800 \text{ Гц}$; $U_{\text{м и}} = 5 \text{ В}$; $U_{\text{нас}} = 13,5 \text{ В}$; $U_{\text{VD}} = 0,5 \text{ В}$;
 $t_{\text{и}} = 1 \cdot 10^{-3} \text{ с}$;

$$R_1 = 10 \text{ кОм}; R_2 = 27 \text{ кОм};$$

$$t_{\text{п}} = 0,25 \cdot 10^{-3} \text{ с}; \tau = 1 \cdot 10^{-3} \text{ с}; C = 0,1 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}; R = 10 \text{ кОм};$$

$$R_3 = \frac{10^4 (13,5 - 0,5) 0,25 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 1 \cdot 10^{-3} \cdot 5 + 10 \cdot 0,25 \cdot 10^{-3}} = 2,6 \text{ кОм};$$

$$U_{\text{вх max}} = 50 \text{ В}; 50 \text{ В} > U_{\text{вх}} > 0; f_{\text{max}} = 1250 \text{ Гц}; t_{\text{и}} = t_{\text{п}} = 0,4 \cdot 10^{-3} \text{ с}.$$

Пример 5. Дано: $U_{\text{вх}} = 10 \text{ В}$; $f = 800 \text{ Гц}$; $U_{\text{м и}} = 5 \text{ В}$; $U_{\text{нас}} = 13,5 \text{ В}$; $U_{\text{VD}} = 0,5 \text{ В}$;
 $t_{\text{и}} = t_{\text{п}} = 0,625 \cdot 10^{-3} \text{ с}$;

$$R_1 = 10 \text{ кОм}; R_2 = 27 \text{ кОм};$$

$$t_{\text{и}} = t_{\text{п}} = \tau = 0,625 \cdot 10^{-3} \text{ с}; C = 0,1 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}; R = 6,25 \text{ кОм};$$

$$R_3 = \frac{6,25 \cdot 10^3 (13,5 - 0,5) 0,625 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 0,625 \cdot 10^{-3} \cdot 5 + 10 \cdot 0,625 \cdot 10^{-3}} = 4,06 \text{ кОм};$$

$$U_{\text{вх max}} = \frac{6,25 \cdot 10^3}{4,06 \cdot 10^{-3}} (13,5 - 0,5) = 20 \text{ В}.$$

При $U_{\text{вх}} = 10 \text{ В}$; $f_{\text{max}} = 800 \text{ Гц}$ и $t_{\text{и}} = t_{\text{п}} = 0,625 \cdot 10^{-3} \text{ с}$.

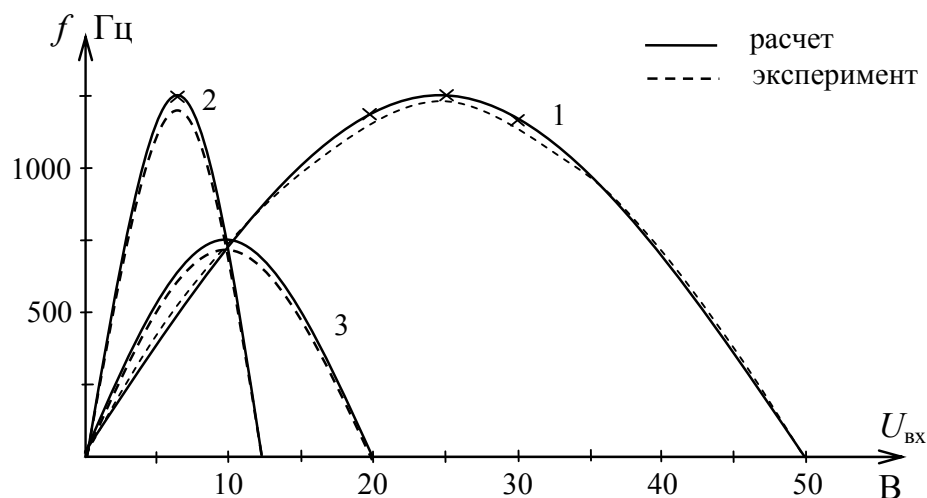


Рис. 5. Графики зависимости f от $U_{\text{вх}}$: для примеров 1 и 4 — линия 1; для примеров 2 и 3 — линия 2; для примера 5 — линия 3

Экспериментальные исследования

Экспериментальное исследование работы ГЛИН-ПНЧ (рис. 1, 3) проводилось с использованием микросхемы К157УД2 и полупроводникового диода КД522, для которых экспериментально были определены величины $U_{\text{нас}} = 13,5 \text{ В}$ и падение напряжения при прямом включении диода $U_{\text{VD}} = 0,5 \text{ В}$.

Устройства по примерам 1 и 4, когда $R > R_3$ обеспечивали высокую степень совпадения экспериментальных параметров с расчетными, при не очень высоких требованиях к точности значений параметров RC -элементов, что объясняется невысокой скоростью изменения f от $U_{\text{вх}}$ (линия 1 на рис. 5).

Для устройств по примерам 2 и 3 R сравнима с R_3 , что приводит к увеличению скорости изменения f от $U_{\text{вх}}$ и к существенному увеличению требований на точность значений параметров RC -элементов для совпадения экспериментальных параметров импульсов с расчетными.

Устройство по примеру 5 работает стабильно и занимает промежуточное положение по требованиям на точность выставок значений параметров RC -элементов.

Заключение

Из сравнения полученных результатов с данными работы [2] следует, что использование $t_{\text{и}}$ в качестве заданной величины существенно снижает трудоемкость расчета параметров RC -элементов ГЛИН-ПНЧ. При этом исключается необходимость выбора R_3 из неравенства (11) [2] и определения R из решения квадратного уравнения (10) [2].

Параметры RC -элементов определяются в данной работе по строгим выражениям (3), (7), (10) при $U_{\text{вх}} < 0$ или по (12), (13), (14) при $U_{\text{вх}} > 0$.

Использование R_- по работе [2] обеспечивает взаимную замену значений $t_{\text{и}}$ и $t_{\text{п}}$ и одновременно приводит к необходимости выставлять значения параметров RC -элементов с высокой точностью. В данной работе показано, что замену значений $t_{\text{и}}$ и $t_{\text{п}}$ лучше выполнить, перейдя к схеме рис. 3 при неизменных параметрах RC -элементов, что сохраняет стабильность работы устройства и характер зависимости f от $U_{\text{вх}}$. Рассчитанное по предложенным в данной работе выражениям устройство (рис. 1, 3) обеспечивает кроме преобразования $U_{\text{вх}}$ в f , получение на выходе интегрирующего усилителя двухполярных пилообразных импульсов с требуемыми (наперед заданными) значениями $t_{\text{и}}$, $t_{\text{п}}$, $U_{\text{м и}}$.

Устройство (рис. 1, 3) работоспособно при $U_{\text{вх max}} > U_{\text{вх}} > 0$, где $U_{\text{вх max}} = \frac{R}{R_3}(U_{\text{нас}} - U_{\text{VD}})$.

При $U_{\text{вх}} = \frac{U_{\text{вх max}}}{2}$ на выходе интегрирующего усилителя формируются симметричные двухполярные треугольные импульсы с параметрами $t_{\text{и}} = t_{\text{п}} = \frac{4R_3CU_{\text{м и}}}{U_{\text{нас}} - U_{\text{VD}}}$, что соответствует максимальной частоте генерируемых импульсов $f_{\text{max}} = \frac{U_{\text{нас}} - U_{\text{VD}}}{8U_{\text{м и}}R_3C}$.

Литература

1. Чубриков, Л. Г. Основы промышленной электроники / Л. Г. Чубриков. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2003. – 255 с.
2. Изотов, П. П. Уточнение метода расчета преобразователя напряжение-частота / П. П. Изотов // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. – 2011. – № 2. – С. 52–60.
3. Горбачев, Г. Н. Промышленная электроника : учеб. для вузов / Г. Н. Горбачев, Е. Е. Чаплыгин. – М. : Энергоатомиздат, 1988. – 320 с.

Получено 12.06.2012 г.